

# 非掺杂 AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HEMT 微波功率器件\*

曾庆明<sup>1</sup> 李献杰<sup>1</sup> 周 洲<sup>1</sup> 王 勇<sup>1</sup> 王晓亮<sup>2</sup>

(1 中国电子科技集团公司第 13 研究所, 石家庄 050051)

(2 中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

**摘要:** 介绍了非掺杂 Ga<sub>N</sub> HEMT 微波功率器件的结构、制造工艺和测试结果. 制作了几种 0.6 μm 栅长、100~1000 μm 不同栅宽的器件, 对于栅宽分别为 100, 300 和 500 μm 的器件, 典型最大跨导为 190~170 mS/mm; 截止频率比较相近, 大约为 24 GHz; 而最高振荡频率随栅宽增加而降低, 分别为 56, 46 和 40 GHz. 测试了 8 GHz 频率时, 不同工作条件下 1000 μm 栅宽器件的连续波微波功率特性:  $V_{ds} = 17V, I_d = 310mA, P_{in} = 25.19dBm$  时,  $P_o = 30dBm$  (1W),  $G_a = 4.81dB; V_{ds} = 18V, I_d = 290mA, P_{in} = 27dBm$  时,  $P_o = 31.35dBm$  (1.37W),  $G_a = 4.35dB$ .

**关键词:** Ga<sub>N</sub>; HEMT; 微波功率器件

**EEACC:** 1350F; 2520M; 2560S

中图分类号: TN325.3

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2005)S0-0151-04

## 1 引言

宽禁带半导体 Ga<sub>N</sub> 具有载流子饱和速度大, 击穿电场高、高温工作特性好和化学稳定性好等优点, 加之 Ga<sub>N</sub> 及相关化合物可以构成异质结构, 使得 Ga<sub>N</sub> 成为继 Si, GaAs 和 InP 材料之后最重要的新型半导体材料. 由于自发极化效应和压电极化效应的存在, AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> 高电子迁移率晶体管 (HEMT) 的二维电子气 (2DEG) 浓度较传统 AlGaAs/GaAs HEMT 约大一个数量级, 因此 Ga<sub>N</sub> HEMT 在微波大功率器件应用方面有较大优势, 成为当前国内外争相研究的课题. 虽然 AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HEMT 可能得到高压、大电流的直流输出特性, 但工作中常常出现由于器件隔离不好, 击穿电压很低; 或者在高频、甚至低频情况下器件电流性能急剧下降, 也就是目前人们特别关注的电流崩塌效应, 严重影响了 Ga<sub>N</sub> HEMT 微波功率输出性能. 我们立足国内外延层生长和器件制作条件, 开展了 Ga<sub>N</sub> HEMT 微波功率器件研究, 对外延层结构设计和生长、器件制作工艺、器件直流和微波特性等进行了较系统的研究, 采用非掺杂 AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> 材料结构, 制作了栅长为 0.6 μm, 栅宽分别为 100, 300, 500 和

1000 μm 4 种 AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HEMT 器件, 得到初步的微波功率测试结果.

## 2 器件制作

在 50mm 蓝宝石衬底上, 逐层生长 3000nm Si-GaN, 120nm Ga<sub>N</sub> 和 20nm AlGa<sub>N</sub>, 在整片上测量 55 个点得到平均薄层电阻为 ~467.8 Ω/□, 均匀性为 4.46%.

从频率性能和功率性能折中考虑, 设计器件栅长为 0.6 μm; 按栅宽不同, 设计了 100, 300, 500 和 1000 μm 4 种不同的器件结构, 分别由 2, 6, 10 和 20 条栅组成; 器件源、漏间距为 3 μm. 器件采用 50mm 圆片工艺制作, 主要制作工艺如下: 首先是台面隔离, 采用感应耦合等离子体 (ICP) 刻蚀系统, 将有源区台面周围向下刻蚀到缓冲层; 其次采用电子束蒸发 Ti/Al/Ni/Au 多层金属结构并剥离, 在 900°C 温度下快速热退火形成源、漏欧姆接触, 用传输线测量方法 (TLM) 得到每毫米栅宽接触电阻 1.3 Ω·mm, 它比同批制造的调制掺杂 Ga<sub>N</sub> HEMT 大一些, 这主要是因为非掺杂结构所致; 然后是电子束蒸发 Ni/Au 并剥离, 形成肖特基势垒栅金属; 最后电镀 3 μm 厚金层形成空气桥连接和附加的散热通路, 前

\* 国家自然科学基金重点项目 (批准号: 60136020) 和国家重点基础研究发展规划 (批准号: 51327030201) 资助项目

道工艺完成. 图 1(a)和(b)分别为制造完成后的 $500\mu\text{m}$ 栅宽和 $1000\mu\text{m}$ 栅宽器件照片,插图为空气桥制作前的局部照片.

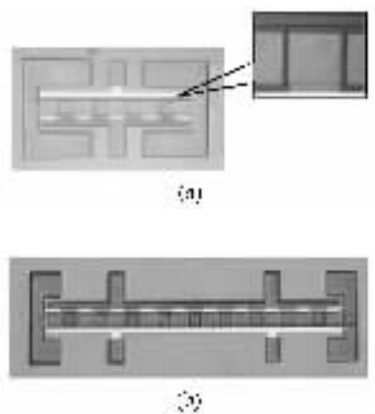


图 1  $500\mu\text{m}$ 栅宽(a)和 $1000\mu\text{m}$ 栅宽(b) GaN HEMT 器件照片 插图为空气桥工艺前的有源区局部照片.

Fig. 1 Photograph of GaN HEMT with a 500 and  $1000\mu\text{m}$  gate width The inset is the photograph of the part of the active area before the process for air bridge.

### 3 结果和讨论

在 ICP 台面腐蚀和源、漏欧姆接触完成后测量隔离特性,平行相邻两台面间的击穿电压大于 $290\text{V}$ (电流小于 $10\mu\text{A}$ ),同样的几何尺寸在台面下的击穿电压大于 $200\text{V}$ ,表明材料缓冲层有良好的隔离特性,而这在一般 MOCVD 生长的调制掺杂 GaN HEMT 材料缓冲层隔离特性却不容易实现,往往需要再借助于离子注入来得到比较好的隔离特性.我们在栅制造完成后测量单元器件的直流输出特性,随着栅压的增加,饱和漏电流 $I_{\text{dss}}$ 由零偏压时的 $70\text{mA}$ 迅速下降一半以上,器件的开态电阻迅速增加,说明器件的电流崩塌效应非常严重;器件表面进行 $\text{Si}_3\text{N}_4$ 钝化后再测其直流输出特性,上述现象基本消失,观察到基本稳定的直流输出特性.

用 Keithley 4200-SCS 半导体测试系统在整个 $50\text{mm}$ 圆片范围内在片对各种管芯的直流特性进行了测试.随片上位置不同,阈值电压从 $-2.4\text{V}$ 变化到 $-4.0\text{V}$ ;100到 $1000\mu\text{m}$ 栅宽器件的器件典型最大跨导为 $200\sim 170\text{mS/mm}$ ,随着栅宽增加,器件最大跨导略有下降;最大漏电流 $\sim 700\text{mA/mm}$ .图 2 给出 $100\mu\text{m}$ 栅宽器件的典型直流输出特性,可以看出其跨导约为 $190\text{mS/mm}$ ,阈值电压为 $-3.0\text{V}$ .

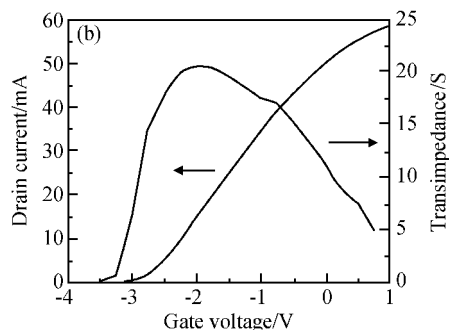
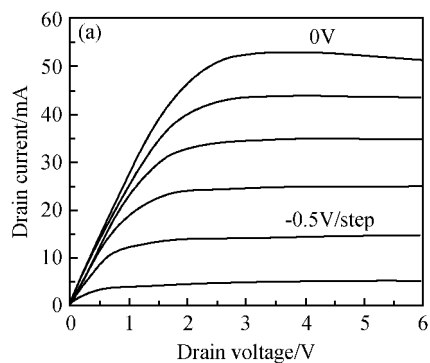


图 2  $100\mu\text{m}$ 栅宽 GaN HEMT 器件的直流输出特性(a)和转移特性(b)

Fig. 2 Current-voltage characteristics (a) and transfer characteristics (b) of GaN HEMT with  $100\mu\text{m}$  gate width

用微波探针和 HP 8510B 网络分析仪在 $0.1\text{GHz}$ 到 $40.1\text{GHz}$ 频率范围在片测试了 $100, 300$ 和 $500\mu\text{m}$ 栅宽器件的小信号 $S$ 参数,计算得到直流增益 $H_{21}$ 和单向功率增益 $G_u$ 随频率的变化,如图 3 所示.图中 $D, C, B$ 分别为栅宽 $100, 300$ 和 $500\mu\text{m}$ 器件的 $H_{21}$ ;  $G, E$ 和 $F$ 分别为栅宽 $100, 300$ 和 $500\mu\text{m}$ 器件的 $G_u$ .与 $G, E$ 和 $F$ 相应的3根虚线是按增益每倍频率程下降 $6\text{dB}$ 的拟合线.由此可以看出 $100, 300$ 和 $500\mu\text{m}$ 器件的 $f_T$ 相近,大约为 $24\text{GHz}$ ;而 $f_{\text{max}}$ 随栅宽增加而降低,对于栅宽 $100, 300$ 和 $500\mu\text{m}$ 器件,相应的 $f_{\text{max}}$ 为 $56, 46$ 和 $40\text{GHz}$ .

完成前道工艺的 GaN HEMT 圆片的蓝宝石衬底减薄到约 $110\mu\text{m}$ ,划片后用导电胶将管芯装配在我们现有的 GaAs 微波功率管壳上,用 $8\text{GHz}$  GaAs 微波功率管测试系统测量了 $1000\mu\text{m}$ 栅宽器件连续波状态下共源微波输出功率和功率增益.当源漏电压 $V_{\text{ds}} = 17\text{V}$ ,漏电流 $I_{\text{d}} = 310\text{mA}$ ,输入功率 $P_{\text{in}} = 25.19\text{dBm}$ 时,测得输出功率 $P_{\text{o}} = 30\text{dBm}$ ( $1\text{W}$ ),功

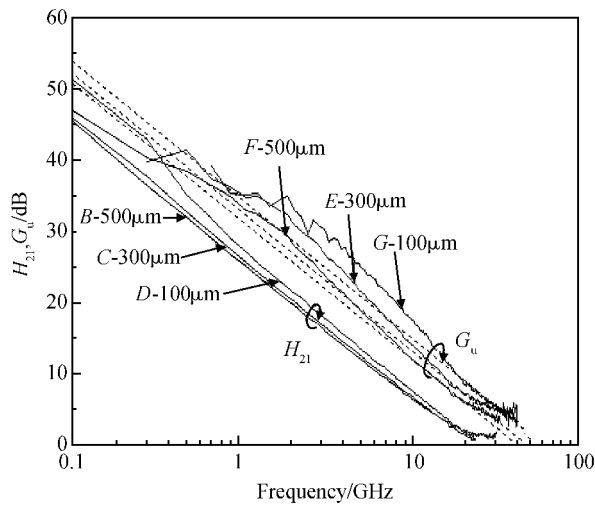


图3 AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HEMT 电流增益  $H_{21}$  和单向功率增益  $G_u$  随频率的变化

Fig. 3 Current gain  $H_{21}$  and unilateral power gain  $G_u$  versus frequency for AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HEMT

率增益  $G_a = 4.81\text{dB}$ ; 当源漏电压  $V_{ds} = 18\text{V}$ , 漏电流  $I_d = 290\text{mA}$ , 输入功率  $P_{in} = 27\text{dBm}$  时, 测得输出功率  $P_o = 31.35\text{dBm}$  ( $1.365\text{W}$ ), 功率增益  $G_a = 4.35\text{dB}$ . 在测量微波功率特性时观察到随着输入功率的增加, 工作电流逐渐降低, 并且测量时所能加的工作点比根据直流特性所预期的低得多, 这一方面是由于器件散热不好带来的自热效应的影响, 另一方面很大程度上则是因为尽管经过  $\text{Si}_3\text{N}_4$  钝化后直流特性趋于稳定, 但射频栅压下的电流崩塌效应仍然没有较好地克服而导致器件饱和区加大造成的. 因此如何进一步改善电流崩塌效应, 仍是将来工作中所面对的主要问题.

此外, 值得指出的是下面两方面的因素限制了功率测试过程中器件功率性能的发挥: 一方面由于没有专用的蓝宝石衬底减薄装置, 只能人工将蓝宝石衬底减薄到约  $110\mu\text{m}$ , 而蓝宝石热导率比较小, 在一定程度上影响了器件的散热; 另一方面由于芯片背面没有进行金属化工艺, 芯片在封装时采用导电胶背面与管壳粘接, 而没有采用金锡焊料烧结的方法, 使得器件在工作状态下的散热性能进一步大打折扣. 如果进一步减薄蓝宝石衬底和采用背面金属烧结工艺, 预期器件的功率输出和功率增益会有较大的提高. 当然, 蓝宝石衬底 Ga<sub>N</sub> HEMT 器件的散热问题, 最终还得用倒装焊技术, 将芯片倒装在热导率高的 AlN 基片上来解决.

为了分析器件在功率测量过程中热分布的情

况, 我们用 INFRE SCOPE-II 红外热像仪测量了封装后  $1000\mu\text{m}$  栅宽器件加直流工作点情况下的温度分布, 如图 4, 工作点为  $I_{ds} = 630\text{mA}$ ,  $V_{ds} = 11\text{V}$ , 图中芯片热像形貌可以与图 1(b) 中芯片照片作比较. 由图看出蓝宝石表面温度大约  $115^\circ\text{C}$ , 底座表面温度大约  $71^\circ\text{C}$ , 由于背面用导电胶粘接导致芯片散热不好, 芯片表面最高温度达  $173.136^\circ\text{C}$ . 但由于器件版图设计中充分考虑了热分布的均匀性和制作工艺中采用了空气桥连接形成附加的散热通路, 所以总体来看芯片上温度分布还比较均匀.

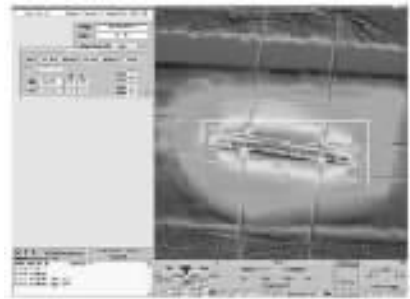


图4 装配后的  $1000\mu\text{m}$  栅宽 AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HEMT 器件在  $I_{ds} = 630\text{mA}$ ,  $V_{ds} = 11\text{V}$  时的热像图

Fig. 4 Thermal image of packaged AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HEMT with  $1000\mu\text{m}$  gate width at  $I_{ds} = 630\text{mA}$ ,  $V_{ds} = 11\text{V}$

非掺杂 Ga<sub>N</sub> HEMT 与调制掺杂 Ga<sub>N</sub> HEMT 比较, 前者比较容易得到良好的隔离, 有高的击穿电压, 但电流崩塌效应似乎更明显.

## 4 结论

用非掺杂 AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> 材料结构, 设计制作了栅长为  $0.6\mu\text{m}$ , 栅宽分别为  $100, 300, 500$  和  $1000\mu\text{m}$  4 种 AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HEMT 器件, 典型最大跨导为  $190\sim 170\text{ms/mm}$ ; 截止频率大约为  $24\text{GHz}$ ; 而最高振荡频率随栅宽增加而降低, 对应  $100, 300, 500\mu\text{m}$  不同栅宽, 分别为  $55, 46$  和  $40\text{GHz}$ . 测试了  $8\text{GHz}$  频率时, 不同工作条件下  $1000\mu\text{m}$  栅宽器件的连续波微波功率特性:  $V_{ds} = 17\text{V}$ ,  $I_d = 310\text{mA}$ ,  $P_{in} = 25.19\text{dBm}$  时,  $P_o = 30\text{dBm}$ ,  $G_a = 4.81\text{dB}$ ;  $V_{ds} = 18\text{V}$ ,  $I_d = 290\text{mA}$ ,  $P_{in} = 27\text{dBm}$  时,  $P_o = 31.35\text{dBm}$   $= 1.37\text{W}$ ,  $G_a = 4.35\text{dB}$ . 这是目前国内首次在 X 波段实现连续波输出瓦级的 AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HEMT 功

率器件样品报道. 采用  $\text{Si}_3\text{N}_4$  钝化获得了较稳定的直流输出特性, 但射频条件下的电流崩塌效应仍然比较严重. 进一步改善电流崩塌效应和改进器件封装问题, 是下一步工作中需要考虑的主要问题.

**致谢** 器件的研制工作主要在中国电子科技集团公司第 13 研究所第一专业部完成, 得到专业部内各研究室、工艺组同仁的鼎力支持; 邱旭、陈鹏、韩丽华等同志帮助测量了微波功率和  $S$  参数; 张万生、李云、袁文华、乔树允、王全树和刘春丽等同志也给予了许多帮助, 在此一并表示感谢.

## 参考文献

- [ 1 ] Tarakyji A, Simin G, Ilinskaya N, et al. Mechanism of radio-frequency current collapse in GaN-AlGaIn field-effect transistors. *Appl Phys Lett*, 2001, 78: 2171
- [ 2 ] Mittereder J A, Binari S C, Klein P B, et al. Current collapse induced in AlGaIn/GaN high-electron-mobility transistors by bias stress. *Appl Phys Lett*, 2003, 83: 1650
- [ 3 ] Verzellesi G, Pierobon R, et al. Experimental/numerical investigation on current collapse in AlGaIn/GaN HEMT's. *IEDM Technical Digest*, 2002: 689

## Investigation of Undoped AlGaIn/GaN Microwave Power HEMT

Zeng Qingming<sup>1</sup>, Li Xianjie<sup>1</sup>, Zhou Zhou<sup>1</sup>, Wang Yong<sup>1</sup>, and Wang Xiaoliang<sup>2</sup>

(1 13th Institute of China Electronic Technology Corporation, Shijiazhuang 050051, China)

(2 Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The structure, process, and performance of undoped AlGaIn/GaN microwave power high electronic mobility transistors (HEMTs) are presented. Devices with the gate length and width of  $0.6\mu\text{m}$  and  $100\sim 1000\mu\text{m}$  are developed. For those with the gate width of 100, 300, and  $500\mu\text{m}$ , the typical maximum transconductance is in the range of  $190\sim 170\text{mS/mm}$ ; the cut-off frequency is about 24GHz; the maximum oscillation frequency is 55, 46, and 40GHz, respectively. The continuous microwave power performance in different bias condition for the sample with  $1000\mu\text{m}$  gate width is measured. When  $V_{\text{ds}} = 17\text{V}$ ,  $I_{\text{d}} = 310\text{mA}$ , and  $P_{\text{in}} = 25.19\text{dBm}$ ,  $P_{\text{o}} = 30\text{dBm}$  (1W),  $G_{\text{a}} = 4.81\text{dB}$ ; When  $V_{\text{ds}} = 18\text{V}$ ,  $I_{\text{d}} = 290\text{mA}$  and  $P_{\text{in}} = 27\text{dBm}$ ,  $P_{\text{o}} = 31.35\text{dBm}$  (1.37W),  $G_{\text{a}} = 4.35\text{dB}$ .

**Key words:** undoped; GaN; HEMT; microwave power devices

**EEACC:** 1350F; 2520M; 2560S

**Article ID:** 0253-4177(2005)S0-151-04

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 60136020) and the State Key Development Program for Basic Research of China (No. 51327030201)